

(19) Europäisches Patentamt  
European Patent Office  
Office européen des brevets



(11) EP 0 827 267 A1

4

(12) EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
04.03.1998 Patentblatt 1998/10 (51) Int. Cl. 6: H02P 7/62

(21) Anmeldenummer: 96112824.6

(22) Anmeldetag: 08.08.1996

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
AT BE CH DE DK ES FR GB GR IE IT LI LU MC NL  
PT SE  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
AL LT LV SI

(71) Anmelder:  
SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT  
80333 München (DE)

(72) Erfinder:  
• Künzel, Stefan  
91056 Erlangen (DE)  
• Kreienkamp, Ulrich  
91058 Erlangen (DE)

(54) Verfahren zur Bestimmung der Lage des Flussmaximums bei einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine sowie Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

(57) Zur feldorientierten Regelung einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine muß beim Einschalten die Rotorlage und damit die Lage des magnetischen Flußmaximums ( $\phi_F$ ) bekannt sein. Gemäß der vorliegenden Erfindung wird dieser Parameter ermittelt, indem Spannungsimpulse mit konstanter Zeitfläche ( $\int U \cdot di$ ) eingeprägt werden, welche einen Stromanstieg ( $di$ ) zur Folge haben, der von der Ankerinduktivität ( $L_A$ ) abhängig ist und über eine Kreuzkorrelationsfunktion ausgewertet wird. Es werden jeweils Spannungsimpulse mit gleicher Spannungszeitfläche eingeprägt, wobei deren Wirkungsrichtung durch

Drehung des Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) in festen Gradabständen von  $360^\circ$  gedreht wird und auf einen Spannungsimpuls immer der Spannungsimpuls mit einem um  $180^\circ$  gedrehten Spannungsraumzeiger ( $\phi_U$ ) folgt. Dabei wird jeweils der Stromanstieg ( $di$ ) gemessen und mit dem zugehörigen Spannungsraumzeiger ( $\phi_U$ ) aufgezeichnet. Die Lage des Flußmaximums ( $\phi_F$ ) wird anhand des zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gehörenden Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) bestimmt.

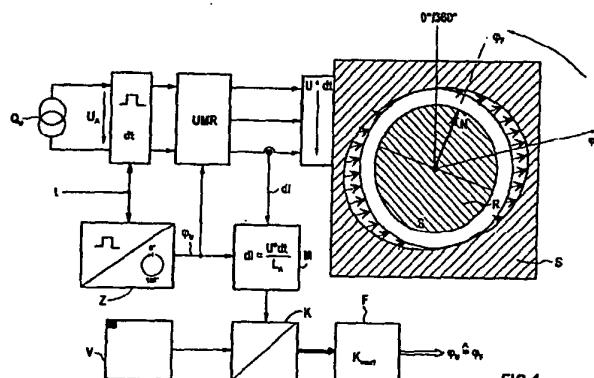


FIG 1

EP 0 827 267 A1

**Beschreibung**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren sowie eine Vorrichtung zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums bei einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine.

5 Bei der Regelung von permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschinen hat sich das Verfahren der feldorientierten Regelung etabliert. Dabei wird der Motorstrom bezüglich des magnetischen Flusses in der Synchronmaschine vorgegeben. Da sich bei einem permanenterregten oder fremdmagnetisierten Läufer bzw. Rotor der magnetische Fluß mit der Läuferstellung verändert, kennt man die Lage des magnetischen Flusses nur dann, wenn die Rotorlage und zusätzlich eine eventuell vorhandene Verschiebung der Nullage des Rotorlagemeßsystem zur Lage des

10 Flußmaximums bekannt sind.

In der Regel werden bei permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschinen inkrementelle bzw. relative Rotorlagemeßsysteme eingesetzt. Ein solches inkrementelles Rotorlagemeßsystem kann beispielsweise auf optischer Basis, z.B. durch Einsatz eines Glasmaßstabes, oder auf magnetischer Basis durch Einsatz eines Resolvers basieren. Durch solche inkrementelle Rotorlagemeßsysteme wird nur eine relative Veränderung der Rotorlage erfaßt.

15 Somit besitzt ein inkrementelles Rotorlagemeßsystem keinen wirklichen Nullpunkt.

Nach jedem Einschalten muß daher - wie bereits erwähnt - eine eventuelle Verschiebung des Nullpunktes zwischen dem Rotorlagemeßsystem und dem Motor-Magnetflußmaximum abgeglichen werden, wenn die Synchronmaschine feldorientiert geregelt betrieben werden soll.

Ein Fehler von mehr als 90° el. in der Orientierung führt bei einer feldorientierten Regelung bereits zu einer

20 Momentenumkehr bei der permanenterregten Synchronmaschine und damit zu einer Mitkopplung im drehzahlgeregelten Betrieb. Die Synchronmaschine beschleunigt dann bis hin zur Abschaltung oder gar Zerstörung. Doch auch bereits eine Abweichung von wenigen Grad elektrisch kann bei einer Feldorientierung zu einem erheblich höheren Spannungsbedarf der Synchronmaschine sowie zu Fehlern bei der Spannungsvorsteuerung führen. Dies trifft um so mehr zu, je größer die elektronische Motorfrequenz und der Fehlwinkel sind. Hinzu kommt, daß die Momentenausbeute bei

25 gleicher Strom sinkt.

Bei bisher bekannten Lösungen wurde daher zusätzlich zu einem inkrementellen bzw. relativen Rotorlagemeßsystem ein absolutes Meßsystem eingesetzt, wobei die Nullmarke und das absolute Meßsystem auf das Maximum der Motor-Magnetflußlage justiert sein müssen. Eine eventuelle Nullpunktverschiebung wird dann abhängig von dem Absolutlagesystem bestimmt.

30 Die Justage muß jedoch mechanisch sehr genau sein, denn bereits ein Fehler von wenigen Grad elektrisch hat die bereits geschilderten Nachteile wie erhöhten Spannungsbedarf und geringere Momentenausbeute bei gleichem Strom zur Folge. Beispielsweise muß bei einer Polpaarzahl von vier und einer Genauigkeit von 4° el. die Justage auf 1° mechanisch genau erfolgen. Das inkrementelle Meßsystem besitzt somit zusätzlich eine Absolutspur und eine Nullmarke, benötigt zusätzliche Meßleitungen ist somit aufwendiger und kostenintensiver als rein inkrementelles Rotorlagemeßsystem.

35 Beim Einschalten der feldorientierten Regelung der Synchronmaschine muß zunächst die Absolutspur ausgelesen werden und dabei eine eventuelle Nullpunktverschiebung bestimmt werden. Dies kann jedoch nur relativ grob im Rahmen der Auflösung der Absolutspur geschehen. Erst beim Überfahren der Nullmarke kennt man die Nullpunktverschiebung genau und kann eine Feinjustage durchführen. Ist die Polpaarzahl der Synchronmaschine jedoch sehr groß, beispielsweise größer als 10, so kann die erforderliche Genauigkeit bei der Justage der Absolutspur in der Regel nicht mehr sicher erbracht werden, was zur Folge hat, daß derartige Synchronmaschinen nur schlecht für eine

40 feldorientierte Regelung eingesetzt werden können.

Bei einer zyklischen Vertauschung der Motorzuleitungen einer dreiphasigen Synchronmaschine führt jedoch auch dieses bekannte Verfahren zu einer Fehlorientierung von 120°, so daß die Synchronmaschine dann im drehzahlgeregelten Betrieb bis zur Abschaltung beschleunigt, was Gefahren für Mensch und Maschine nach sich ziehen kann. Bei

45 Synchronmaschinen mit einer Hohlwelle, beispielsweise einem Direkt-Spindel-Antrieb an einer Drehmaschine, muß ein Hohlwellen-Rotorlagemeßsystem zum Einsatz kommen. Solche Meßsysteme sind jedoch sehr teuer. Das kostengünstigste derartige Meßsystem mit der erforderlichen Auflösung ist ein Zahnradgeber, welcher allerdings keine Absolutspur besitzt. Aus diesem Grund muß in der Regel auf ein sehr teueres optisches Hohlwellenmeßsystem ausgewichen werden, wenn eine Absolutspur erforderlich ist. Da Direkt-Antriebe in der Regel vom Anwender montiert werden, bestünde dann in der Praxis auch das Problem, daß die aufwendige und kostenintensive Justage der Absolutspur und der Nullmarke vom Anwender ausgeführt werden müssen. Die hierzu erforderlichen Spezialeinrichtungen sind auf Seiten des Anwenders jedoch in der Regel nicht vorhanden.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, ein Verfahren sowie eine dazugehörige Vorrichtung zu schaffen, welche es ermöglichen, die Lage des Flußmaximums bei einer permanenterregten Synchronmaschine zu erfassen.

55 Aufgrund einer Messung soll zum einen das Absolutmeßsystem und dessen Justage eingespart werden können, zum anderen sollen die Gefahren einer Vertauschung der Motorzuleitungen einer mehrphasigen Synchronmaschine umgangen werden. Somit soll ein präventiver Schutz vor einer Zerstörung der Synchronmaschine bei längerer Begrenzung des Drehzahlreglers oder beim Überschreiten der Maximaldrehzahl geschaffen werden.

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch ein Verfahren mit den folgenden Verfahrensschritten gelöst.

- 5 1.1 die Synchronmaschine wird mit Spannungsimpulsen mit gleicher Spannungszeitfläche beaufschlagt, wobei deren Wirkungsrichtung durch Drehung des Spannungsraumzeigers in definierten Gradabständen über eine volle Umdrehung variiert wird,
- 10 1.2 mit jedem Spannungsimpuls wird jeweils ein Stromanstieg als eine von der jeweils vorherrschenden Ankerinduktivität der Synchronmaschine funktionsabhängige Größe ermittelt,
- 1.3 über die ermittelten Stromanstiegswerte wird mittels einer Kreuzkorrelation mit einer vorgebbaren Vergleichsfunktion das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion bestimmt,
- 1.4 die Lage des Flußmaximums wird anhand des zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gehörenden Spannungsraumzeigers bestimmt.

In einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Spannungszeitfläche der einzuprägenden Spannungsimpulse optimiert. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 20 2.1 die Spannungszeitfläche der Spannungsimpulse wird so gewählt, daß der dadurch eingeprägte Strom eine signifikante Sättigung bzw. Entwässerung des Jochs gewährleistet.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird erreicht, daß das Verfahren auch dann, wenn das Joch nicht gesättigt ist, auf sichere Art und Weise durchgeführt werden kann. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 25 3.1 die Spannungszeitfläche der Spannungsimpulse wird so gewählt, daß der dadurch eingeprägte Strom eine signifikante Sättigung bzw. Entwässerung der Ständerzähne zwischen den Nuten gewährleistet.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Spannungszeitfläche speziell auf den eingesetzten Synchronmotor hin optimiert. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 30 4.1 die Spannungszeitfläche der Spannungsimpulse wird so gewählt, daß der Endwert des Stromanstiegs etwa 1/2 des Maschinenmaximalstroms beträgt.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird der Motorstrom schnellstmöglich wieder auf Null abgebaut. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 35 5.1 nach jedem eingeprägten Spannungsimpuls werden die Maschinenimpulse gelöscht.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Meßgenauigkeit erhöht und der Einfluß von störenden, durch die geschilderten Maßnahmen verursachten Drehungen des Rotors eliminiert. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 40 6.1 sofern eine Drehung des magnetisierten Läufers erfolgt, so wird diese bei der Weiterdrehung des Spannungsraumzeigers berücksichtigt.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Genauigkeit der bestimmten Lage des Flußmaximums über den Meßwertabstand der ermittelten Werte hinaus erhöht. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 45 7.1 es wird zwischen den ermittelten Stromanstiegsmeßwerten interpoliert.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird eine besonders vorteilhafte Vergleichsfunktion zur Durchführung der Kreuzkorrelation definiert. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

- 50 8.1 als Vergleichsfunktion zur Durchführung der Kreuzkorrelation wird eine Funktion gewählt, deren Wert bei einem Winkel von 0 Grad bzw. von 360 Grad maximal ist und die ansonsten einen abfallenden Verlauf gegen Null aufweist.

weist.

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird eine ganz besonders gut geeignete Vergleichsfunktion eingesetzt. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

5

9.1 als Vergleichsfunktion wird eine auf nicht negative Werte begrenzte Cosinus-Funktion gewählt.

10

In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird erreicht, daß das zu schaffende Verfahren zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums sowohl bei gebremster als auch bei ungebremster Synchronmaschine durchführbar ist und daß insbesondere bei einer ungebremsten Synchronmaschine nur eine geringe Bewegung der Motorwelle erfolgt. Dies geschieht durch folgenden weiteren Verfahrensschritt:

15

10.1 auf einen Spannungsimpuls folgt jeweils der im Bezug auf den Spannungsraumzeiger um 180 Grad verdrehte Spannungsimpuls.

15

In einer besonders vorteilhaften Anwendungsmöglichkeit des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung wird eine Möglichkeit zur Bestimmung der Rotorlage einer ausschließlich mit einem inkrementellen bzw. relativen Rotorlagemeßsystem ausgestatteten Synchronmaschine geschaffen. Dies geschieht durch die Verwendung des Verfahrens gemäß einem der vorstehenden Ansprüche zur Bestimmung der Rotorlage einer permanenterregten Synchronmaschine mit einem ausschließlich inkrementellen Rotorlagemeßgeber, wobei eine mögliche Verschiebung zwischen dem Nullpunkt des inkrementellen Meßgebers und dem Motor-Magnetflußmaximum mittels der bestimmten Lage des Flußmaximums korrigiert wird.

20

Um das vorangehend geschilderte Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung mit den jeweiligen vorteilhaften Ausgestaltungen auf besonders einfache Art und Weise effektiv und kostengünstig durchführen zu können, wird des weiteren eine Vorrichtung geschaffen, mit der die Bestimmung der Lage des Flußmaximums bei einer permanenterregten Synchronmaschine ermöglicht wird. Eine solche Vorrichtung weist gemäß der vorliegenden Erfindung folgende Merkmale auf:

30

12.1 es sind eine Spannungsquelle und ein Zeitglied mit vorgebbarer Laufzeit zur Generierung von Spannungsimpulsen mit gleicher Spannungszeitfläche vorgesehen,

12.2 es ist ein Zählglied zur Generierung eines Spannungsraumzeigers mit sich in definierten Gradabständen über eine volle Umdrehung bzw. 360 Grad verändernder Wirkungsrichtung vorgesehen,

12.3 es ist ein Mittel zum Einprägen der Spannungsimpulse mit dem jeweiligen Spannungsraumzeiger in die Synchronmaschine vorgesehen, insbesondere ein Umrichtersystem,

35

12.4 es ist ein Meßglied zur Ermittlung des durch die eingeprägten Spannungsimpulse bewirkten Stromanstiegs als eine von der jeweils vorherrschenden Ankerinduktivität der Synchronmaschine funktionsabhängige Größe vorgesehen,

12.5 es ist ein Funktionsglied zur Bildung einer Kreuzkorrelation über die ermittelten Stromanstiegswerte (di) mit einer in einem Speichermittel hinterlegten Vergleichsfunktion vorgesehen,

40

12.6 es ist ein Mittel zur Bestimmung des zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gehörenden Spannungsraumzeigers vorgesehen.

45

In einer ersten vorteilhaften Ausgestaltung der Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung wird weiterhin erreicht, daß eine Bestimmung der Lage des Flußmaximums sowohl bei gebremster als auch bei ungebremster Synchronmaschine durchführbar ist und daß insbesondere bei einer ungebremsten Synchronmaschine nur eine geringe Bewegung der Motorwelle erfolgt. Dies geschieht durch folgendes weiteres Merkmal:

50

13.1 mit Hilfe des Zählglieds sind aufeinanderfolgende jeweils um 180 Grad verdrehte Spannungsraumzeiger generierbar.

Weitere Vorteile und erforderliche Einzelheiten ergeben sich anhand der nachfolgenden Schilderung eines vorteilhaften Ausführungsbeispiels und in Verbindung mit den Figuren. Es zeigt:

55

FIG 1 ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums bei einer permanenterregten Synchronmaschine zur Ermittlung der Rotorlage dieser Synchronmaschine für eine feldorientierte Regelung derselben,

FIG 2 eine besonders vorteilhafte Vergleichsfunktion,

FIG 3 eine aus den Meßwerten und der in FIG 2 gezeigten Vergleichsfunktion ermittelte Korrelationsfunktion und

FIG 4 eine beispielhafte Strommeßkurve mit Meßwerten in 6°-Abständen mit eingepaßter Vergleichsfunktion.

In der Darstellung gemäß der FIG 1 ist ein Blockschaltbild einer Vorrichtung zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums bei einer permanenten Synchronmaschine mit einem Rotor R und einem Ständer S gezeigt. Der Rotor R bewirkt durch seine Ausrichtung die Lage des Flußmaximums  $\varphi_F$ . Der in den Ständer S eingeprägte Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  ist durch einen in Form von parallel verlaufenden Pfeilen dargestellten Magnetfluß MF veranschaulicht. Dabei ist eine Spannungsquelle  $Q_U$  zur Erzeugung einer Ausgangsspannung  $U_A$  vorgesehen. Diese Spannung wird auf ein Zeitglied mit variabler Laufzeit dt gegeben, so daß an dem Ausgang des Zeitgliedes Spannungsimpulse U mit konstanter Spannungszeitfläche  $\int U dt$  zur Verfügung stehen. Diese werden einem Umrichter UMR zugeführt, über den die Spannungsimpulse U mit konstanter Spannungszeitfläche  $\int U dt$  in die Synchronmaschine eingeprägt werden.

Die vorliegende Erfindung macht sich dabei die Erkenntnis zu Nutze, daß die Ankerinduktivität  $L_A$  der Synchronmaschine mit der magnetischen Sättigung kleiner wird. Häufig wird der magnetische Kreis der Synchronmaschine so ausgelegt, daß das Eisen kurz vor der Sättigung steht oder bereits gesättigt ist. Selbst wenn das Joch der Synchronmaschine nicht gesättigt ist, so sind doch in der Regel die Zähne des Ständers S zwischen den Nuten aufgrund deren geringeren Eisenquerschnitts gesättigt. Ein Strom, der eine magnetische Wirkung in Richtung der Motor-Magnetflußlage hat, treibt das Eisen weiter in die Sättigung. Ein solcher Strom wird als Strom in Flußrichtung bezeichnet. Ein Strom entgegen der Flußrichtung wirkt hingegen entsättigend. Prägt man nun einen Spannungsimpuls mit der Spannungszeitfläche  $\int U dt$  in die Synchronmaschine ein, so ergibt sich nach folgender Berechnungsvorschrift

20

$$di = U dt / L_A$$

ein Stromanstieg, welcher von der Ankerinduktivität  $L_A$  abhängig ist. Dabei muß der Unterschied des Stromanstiegs, welcher sich bei der Einprägung zweier um 180 Grad phasenverschobener Spannungsimpulse einstellt, signifikant 25 sein, um Einflüsse des Meßrauschen auszuschließen. Die einzuprägenden Spannungsimpulse werden daher so bemessen, daß eine Signifikanz gewährleistet ist.

Für eine Bestimmung der Lage des Flußmaximums  $\varphi_F$  werden daher nun Spannungsimpulse mit gleicher Spannungszeitfläche  $\int U dt$  an die Synchronmaschine ausgegeben, wobei die Wirkungsrichtung dieser Spannungsimpulse durch Drehung des Raumzeigers in festen Gradabständen über 360° elektrisch gedreht wird. Dazu ist ein Zählglied Z 30 vorgesehen, welches an seinem Ausgang mit jedem Zählimpuls t einen Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  bereitstellt, der in einem fest vorgebaren Gradabstand um eine Einheit über 360° weitergedreht ist. Legt man einen Gradabstand in ganzen Gradwerten zugrunde, so wird der Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  beispielsweise ausgehend von 0° mit jedem weiteren Spannungsimpuls um 1° verändert.

Handelt es sich um eine ungebremste Synchronmaschine, d.h. der Rotor kann durch die eingeprägten Spannungs- 35 impulse gedreht werden, so wird gemäß der vorliegenden Erfindung auf einen Spannungsimpuls immer der Spannungsimpuls mit einem um 180° verdrehten Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  generiert. Dies hat zur Folge, daß die durch den Strom hervorgerufene Drehung des Rotors R der Synchronmaschine in die eine Richtung durch eine etwa gleich große Drehung in die entgegengesetzte Richtung kompensiert wird und so die absolute Drehung bei einem ungebremsten Motor minimiert wird. In bezug auf das bereits erwähnte Zählglied Z bedeutet dies, daß die am Ausgang bereitgestellten Spannungsraumzeigerwinkel  $\varphi_U$  in festen Gradabständen über 360° laufen, dabei jedoch aufeinanderfolgende Werte jeweils um 180° verdreht sind. Um den Läufer R weiter zu stabilisieren, wird nach jedem um 180° verdrehten Spannungsraumzeiger um weitere 90° versetzt. Anhand eines Beispiels bedeutet dies, daß zuerst ein Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  von 0° dann von 180°, dann von 90°, dann von 270°, dann von 1°, dann von 181°, dann von 91°, dann von 271° usw. ausgegeben wird. Dieser Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  wird ebenfalls an den Umrichter UMR weitergeleitet.

45 Bei jedem Spannungsimpuls U mit konstanter Spannungszeitfläche wird der Stromanstieg di gemessen und mit dem zugehörigen Winkel des Spannungsraumzeigers  $\varphi_U$  aufgezeichnet.

Dazu wird der jeweils ermittelte Stromanstieg di an ein Meßglied M geführt, dem auch der am Ausgang des Stellglieds Z anstehende jeweilige aktuelle Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  zugeführt wird. Aus den aufgezeichneten Werten kann das Maximum der Meßwerte und der dazu gehörige Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  ermittelt werden. Aufgrund der 50 Nutzung, der Meßgenauigkeit und anderen Effekten ergibt sich aber häufig kein glatter Verlauf der Stromanstiegswerte di über den Spannungsraumzeigerwinkel  $\varphi_U$  und auch das Maximum des Stromanstiegs  $di_{max}$  entspricht nicht immer exakt der gesuchten Nullpunktverschiebung.

Über eine darauffolgende Funktionseinheit K wird deshalb nicht lediglich das Maximum des Stromanstiegs  $di_{max}$  aufgesucht, sondern es werden die gesamten Meßwerte, die Stromanstiegswerte di, zum Ergebnis herangezogen. In 55 der Funktionseinheit K wird eine Kreuzkorrelation der Meßwerte mit einer Vergleichsfunktion gebildet, welche in einem Speicherriegel V hinterlegt ist. Die Vergleichsfunktion ist frei vorgebar und wird so gebildet, daß sie den erwarteten Verlauf der Stromanstiege di über den Spannungsraumzeigerwinkel  $\varphi_U$  widerspiegelt, wobei das Maximum der Vergleichsfunktion bei dem Winkel von 0° bzw. 360° auftritt. Im Fall eines sinusförmigen Flußverlaufes kann hierzu z.B. vorteilhaft

eine auf nicht negative Werte begrenzte Cosinus-Funktion eingesetzt werden.

Praktische Versuche haben gezeigt, daß das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung bezüglich der Wahl unterschiedlicher Vergleichsfunktionen ziemlich robust ist. Voraussetzung ist jedoch, daß die Vergleichsfunktion eine Funktion darstellt, die bei einem Winkel von  $0^\circ$  bzw.  $360^\circ$  ihre maximalen Werte aufweist und ansonsten einen abfallenden Verlauf gegen 0 zeigt. Ein Beispiel für die genannte Vergleichsfunktion ist in der Darstellung gemäß FIG 2 gezeigt, wobei die jeweiligen Werte über eine volle Umdrehung von 0 bis  $360^\circ$  über die Abszisse aufgetragen sind.

Ein Beispiel für eine sich aus der Kreuzkorrelation zwischen Stromanstiegswerten  $i$  und der Vergleichsfunktion ergebende Korrelationsfunktion ist in der Darstellung gemäß FIG 3 gezeigt, wobei ebenfalls die Funktionswerte über eine volle Umdrehung von 0 bis  $360^\circ$  über die Abszisse aufgetragen sind.

10 Nach Berechnung der Kreuzkorrelation ergibt das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion den gesuchten Winkel  $\varphi_F$  der Lage des Flußmaximums. Dieses Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion wird in einem weiteren Funktionsglied  $F$  ermittelt. Um trotz weniger Meßwerte eine höhere Genauigkeit als den Meßwertabstand zu erzielen, wird gemäß der vorliegenden Erfindung zwischen den einzelnen Meßwerten interpoliert und so die Genauigkeit gesteigert.

15 Die Berechnungen zur Durchführung der Kreuzkorrelation werden im folgenden anhand eines Beispieles dargestellt, bei dem in festen ganzzahligen Gradabständen vorgegangen wird. Die hierzu erforderlichen Berechnungsvorschriften lauten wie folgt:

$$20 \quad k(\text{winkel}) = \sum_{x=0}^{360^\circ} i(x) \cdot \text{vergl}(x-\text{winkel})$$

25  $k(\text{winkel})$  Kreuzkorrelation für den Winkel  $\text{winkel}$  (wird von 0 bis  $360$  Grad ermittelt)  
 $i(x)$  Stromanstieg (Raumzeigerbetrag) für den Winkel  $x$  (wird von 0 bis  $360$  Grad gemessen).  
 $\text{vergl}(x-\text{winkel})$ : Vergleichsfunktion für den Winkel  $x-\text{winkel}$ .  
 Sie kann z.B. so gewählt werden:

cos(winkel) für  $0 \leq \text{winkel} \leq 90$  Grad

30  $\text{vergl}(\text{winkel}) = 0$  für  $90$  Grad  $\leq \text{winkel} \leq 270$  Grad

cos(winkel) für  $270 \leq \text{winkel} \leq 360$  Grad.

35 Nach jedem Spannungsimpuls  $U$  werden die Motorimpulse gelöscht, um den Motorstrom schnellstmöglich wieder auf 0 abzubauen. Die Spannungszeitfläche  $\int U \cdot dt$  des entsprechenden Zeitgliedes wird so gewählt, daß der Strom ausreicht, eine signifikante Sättigung bzw. Entwässerung in der Synchronmaschine zu erzielen. Selbst wenn das Joch der Synchronmaschine nicht gesättigt ist, so wird die Spannungszeitfläche  $\int U \cdot dt$  doch so gewählt, daß der Strom ausreicht, die Ständerzähne zwischen den Nuten zu sättigen bzw. zu entwässern.

Im Bereich des Flußmaximums führt ein Strom in Flußrichtung zu einer Eisensättigung und damit zu einer gerin-

40 geren Ankerinduktivität  $L_A$ . Dies hat, verglichen mit den Bereichen der Entwässerung, einen größeren Maximalstrom zur Folge. Somit wird das Flußmaximum in dem Bereich gesucht, in dem der Stromanstieg  $i$  seine größten Werte erreicht. Dies geschieht, wie bereits erwähnt, mit Hilfe des Meßgliedes  $M$  und der darauffolgenden Funktionseinheiten  $K$  und  $F$ . Der zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion zugehörige Spannungsraumzeiger  $\varphi_U$  entspricht dann dem Raumzeiger  $\varphi_F$  des Flußmaximums und damit ist die gesuchte Nullpunktverschiebung von Rotorlagemeßsystem und Flußmaximum gefunden.

45 In der Darstellung gemäß FIG 4 ist eine Strommeßkurve mit Meßwerten in  $6^\circ$ -Abständen mit eingepaßter Vergleichsfunktion gezeigt. Der dabei ermittelte Winkel des Spannungsraumzeigers  $\varphi_U$ , welcher zum Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion zugehörig ist, beträgt dabei mit Interpolation  $191^\circ$ . An dieser Stelle befindet sich somit auch die Lage des Flußmaximums  $\varphi_F$ . Mit Kenntnis dieser Lage des Flußmaximums  $\varphi_F$  läßt sich somit auch eine mögliche Verschiebung zwischen dem Nullpunkt des inkrementellen Meßgebers einer permanenterregten Synchronmaschine und dem Motor-Magnetflußmaximum bestimmen und so die Rotorlage auch bei einem Einsatz eines ausschließlich inkrementellen Meßgebers ermitteln. Damit ist eine feldorientierte Regelung der permanenterregten Synchronmaschine mit ausreichender Genauigkeit möglich. Das bedeutet, daß der Spannungsbedarf der Synchronmaschine möglichst gering ist und die Momentenausbeute entsprechend hoch ausfällt.

50 55 Bei praktischen Versuchen hat sich gezeigt, daß das Verfahren und die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung zu einer hohen Genauigkeit führen. Es können für die Wiederholgenauigkeit typischerweise Werte kleiner als  $1^\circ$  el. erreicht werden, für die absolute Genauigkeit bei etwa  $2^\circ$  el. Diese Genauigkeit verschlechtert sich dann, wenn die Spannungszeitfläche  $\int U \cdot dt$  so stark verringert wird, daß der Stromanstieg  $i$  nicht mehr zu signifikanten Sättigungs-

scheinungen führt. Dies kann jedoch an den Meßwerten di erkannt werden. Der Bereich des Maximums muß deutlich höhere Stromanstiegswerte besitzen, als der um  $180^\circ$  verschobene Bereich. Ist dies nicht gewährleistet, so wird die Messung mit größerer Spannungszeitfläche  $\int U dt$  wiederholt.

Als Richtwert kann die Spannungszeitfläche  $\int U dt$  etwa so gewählt werden, daß sich als Endwert des Stromanstiegs di etwa die Hälfte des Motormaximalstroms ergibt. Selbstverständlich sind jedoch auch andere Spannungszeitflächen  $\int U dt$  verwendbar, je nachdem welcher Typ von Synchronmaschinen zum Einsatz gelangt.

Alle in der vorstehenden Beschreibung erwähnten bzw. in den Figuren dargestellten Merkmale sollen, sofern der bekannte Stand der Technik dies zuläßt, für sich allein oder in Kombination als unter die Erfindung fallend angesehen werden.

10 Die vorgehende Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen nach der Erfindung sind zum Zwecke der Veranschaulichung angegeben. Diese sind nicht erschöpfend. Auch ist die Erfindung nicht auf die genaue angegebene Form beschränkt, sondern es sind zahlreiche Modifikationen und Änderungen im Rahmen der vorstehend angegebenen technischen Lehre möglich. Eine bevorzugte Ausführungsform wurde gewählt und beschrieben, um die prinzipiellen Details der Erfindung und praktische Anwendungen zu verdeutlichen, um den Fachmann in die Lage zu versetzen, die Erfindung zu realisieren. Eine Vielzahl bevorzugter Ausführungsformen sowie weitere Modifikationen kommen bei speziellen Anwendungsgebieten in Betracht.

#### Patentansprüche

20 1. Verfahren zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums ( $\phi_F$ ) bei einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine mit folgenden Verfahrensschritten:

25 1.1 die Synchronmaschine wird mit Spannungsimpulsen (U) mit gleicher Spannungszeitfläche ( $\int U dt$ ) beaufschlagt, wobei deren Wirkungsrichtung durch Drehung des Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) in definierten Gradabständen über eine volle Umdrehung variiert wird,  
 1.2 mit jedem Spannungsimpuls (U) wird jeweils ein Stromanstieg (di) als eine von der jeweils vorherrschenden Ankerinduktivität ( $L_A$ ) der Synchronmaschine funktionsabhängige Größe ermittelt,  
 1.3 über die ermittelten Stromanstiegswerte ( $di_{max}$ ) wird mittels einer Kreuzkorrelation mit einer vorgebbaren Vergleichsfunktion das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion bestimmt,  
 30 1.4 die Lage des Flußmaximums ( $\phi_F$ ) wird anhand des zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gehörenden Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) bestimmt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

35 2.1 die Spannungszeitfläche ( $\int U dt$ ) der Spannungsimpulse (U) wird so gewählt, daß der dadurch eingeprägte Strom eine signifikante Sättigung bzw. Entwässerung des Jochs gewährleistet.

3. Verfahren nach Anspruch 1, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

40 3.1 die Spannungszeitfläche ( $\int U dt$ ) der Spannungsimpulse (U) wird so gewählt, daß der dadurch eingeprägte Strom eine signifikante Sättigung bzw. Entwässerung der Ständerzähne zwischen den Nuten gewährleistet.

4. Verfahren nach Anspruch 1, 2 oder 3, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

45 4.1 die Spannungszeitfläche ( $\int U dt$ ) der Spannungsimpulse (U) wird so gewählt, daß der Endwert des Stromanstiegs (di) etwa 1/2 des Maschinenmaximalstroms beträgt.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

50 5.1 nach jedem eingeprägten Spannungsimpuls (U) werden die Maschinenimpulse gelöscht.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

55 6.1 sofern eine Drehung des magnetisierten Läufers erfolgt, so wird diese bei der Weiterdrehung des Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) berücksichtigt.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

7.1 es wird zwischen den ermittelten Stromanstiegsmeßwerten (di) interpoliert.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

5 8.1 als Vergleichsfunktion zur Durchführung der Kreuzkorrelation wird eine Funktion gewählt, deren Wert bei einem Winkel von 0 Grad bzw. von 360 Grad maximal ist und die ansonsten einen abfallenden Verlauf gegen Null aufweist.

9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

10 9.1 als Vergleichsfunktion wird eine auf nicht negative Werte begrenzte Cosinus-Funktion gewählt.

10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, mit folgendem weiteren Verfahrensschritt:

15 10.1 auf einen Spannungsimpuls (U) folgt jeweils der im Bezug auf den Spannungsraumzeiger ( $\phi_U$ ) um 180 Grad verdrehte Spannungsimpuls.

11. Verwendung des Verfahrens gemäß einem der vorstehenden Ansprüche zur Bestimmung der Rotorlage einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine mit einem ausschließlich inkrementellen Rotorlage-meßgeber, wobei eine mögliche Verschiebung zwischen dem Nullpunkt des inkrementellen Meßgebers und dem Motor-Magnetflußmaximum mittels der bestimmten Lage des Flußmaximums ( $\phi_F$ ) korrigiert wird.

20 12. Vorrichtung zur Bestimmung der Lage des Flußmaximums ( $\phi_F$ ) bei einer permanenterregten oder fremdmagnetisierten Synchronmaschine (R, S) mit folgenden Merkmalen:

25 12.1 es sind eine Spannungsquelle ( $Q_U$ ) und ein Zeitglied (dt) mit vorgebbarer Laufzeit zur Generierung von Spannungsimpulsen (U) mit gleicher Spannungszeitfläche ( $\int U dt$ ) vorgesehen,

12.2 es ist ein Zählglied (Z) zur Generierung eines Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) mit sich in definierten Grad-abständen über eine volle Umdrehung bzw. 360 Grad verändernder Wirkungsrichtung vorgesehen,

30 12.3 es ist ein Mittel (UMR) zum Einprägen der Spannungsimpulse (U) mit dem jeweiligen Spannungsraumzeiger ( $\phi_U$ ) in die Synchronmaschine (R,S) vorgesehen, insbesondere ein Umrichtersystem (UMR),

12.4 es ist ein Meßglied (M) zur Ermittlung des durch die eingeprägten Spannungsimpulse bewirkten Strom-anstiegs (di) als eine von der jeweils vorherrschenden Ankerinduktivität ( $L_A$ ) der Synchronmaschine funktions-abhängige Größe vorgesehen,

35 12.5 es ist ein Funktionsglied (K) zur Bildung einer Kreuzkorrelation über die ermittelten Stromanstiegswerte (di) mit einer in einem Speichermittel (V) hinterlegten Vergleichsfunktion vorgesehen,

12.6 es ist ein Mittel (F) zur Bestimmung des zu dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gehörenden Spannungsraumzeigers ( $\phi_U$ ) vorgesehen.

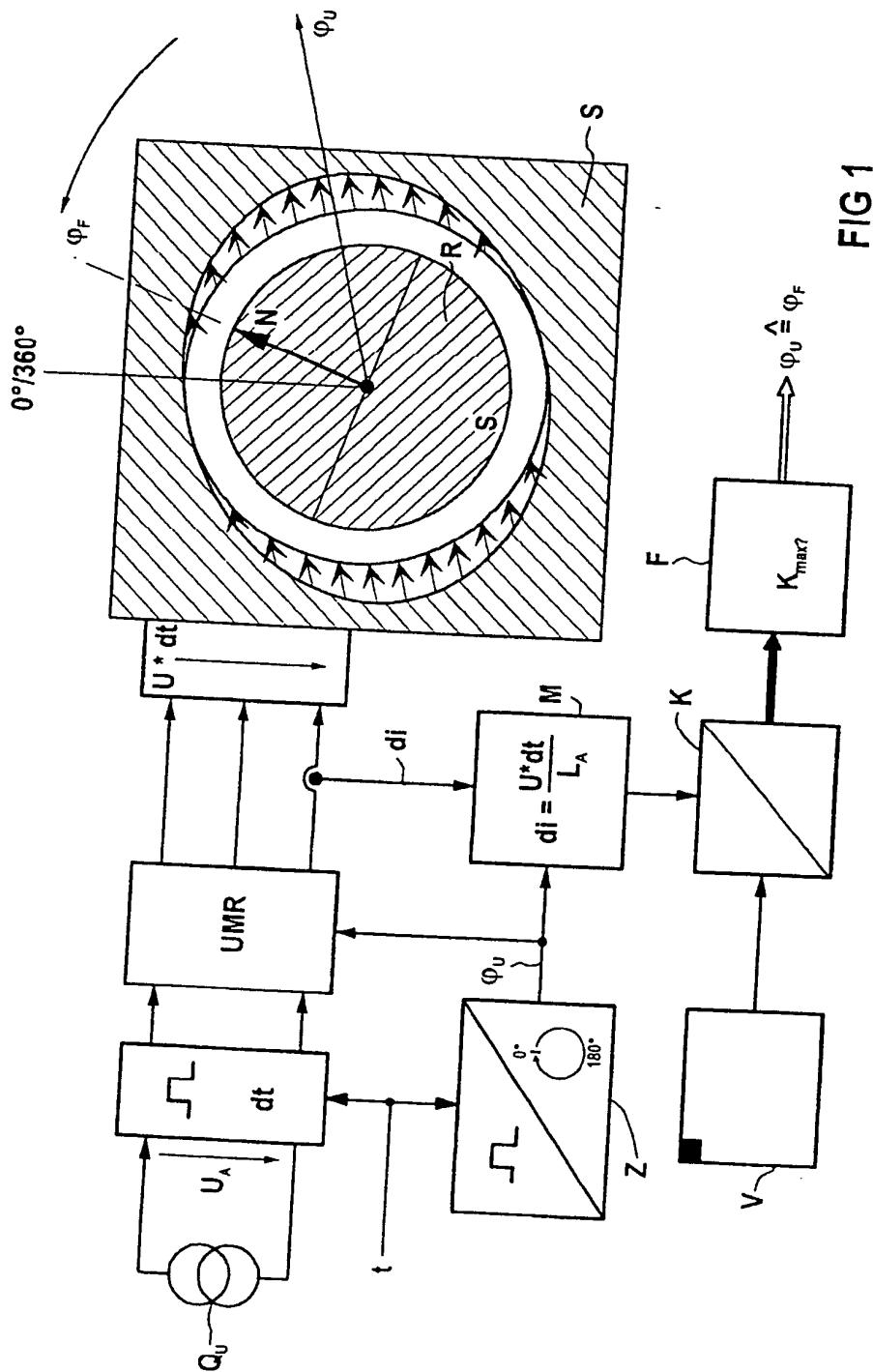
40 13. Vorrichtung nach Anspruch 12, mit folgendem weiteren Merkmal:

13.1 mit Hilfe des Zahnglieds (Z) sind aufeinanderfolgende jeweils um 180 Grad verdrehte Spannungsraumzeiger ( $\phi_U$ ) generierbar.

45

50

55



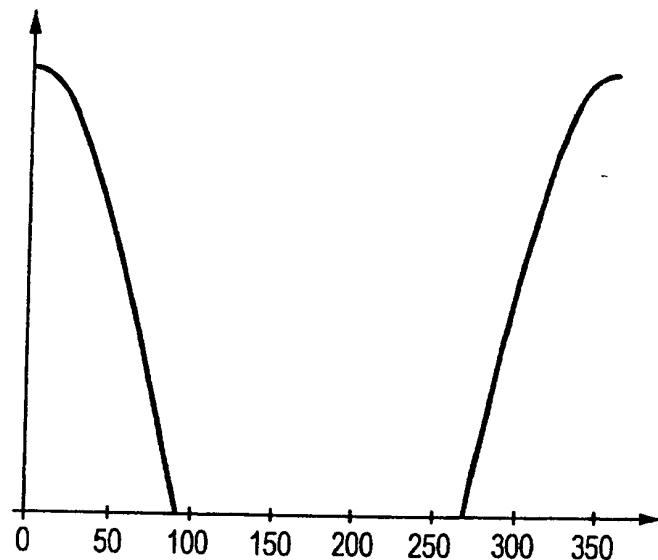


FIG 2

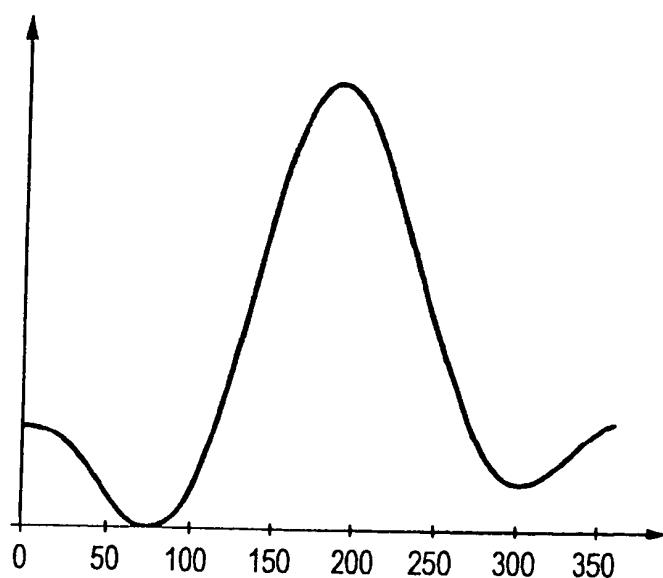


FIG 3

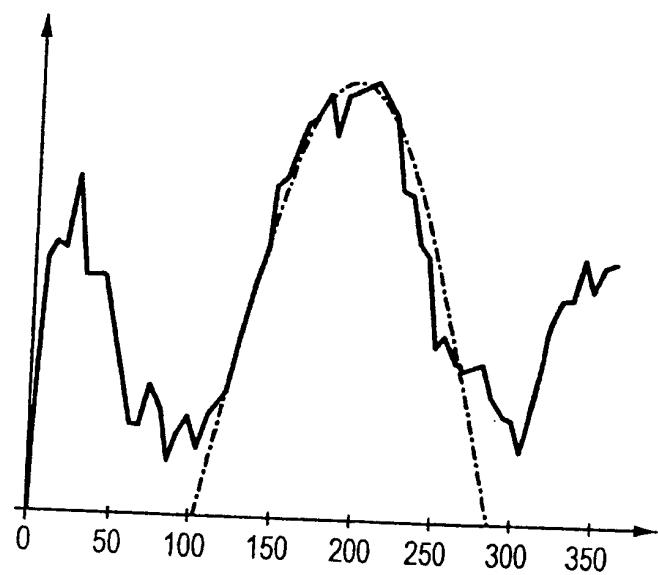


FIG 4

Europäisches  
Patentamt

## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung  
EP 96 11 2824

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (Int.Cl.6)
Y	WO 92 01331 A (ELIN ENERGIEANWENDUNG GMBH) * Seite 9, Zeile 26 - Seite 12, Zeile 17; Anspruch 8; Abbildungen *	1,11,12	H02P7/62
Y	US 4 992 710 A (CASSAT) * Spalte 6, Zeile 12 - Zeile 47; Abbildungen 3,4 *	1,11,12	
A	PATENT ABSTRACTS OF JAPAN vol. 11, no. 217 (E-523), 14.Juli 1987 & JP 62 037085 A (TOSHIBA), 18.Februar 1987, * Zusammenfassung *	1,11,12	
A	POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, Bd. 5, Nr. Drives 1, 13. - 16.September 1993, BRIGHTON, UK, Seiten 311-316, XP000416911 ERTUGRUL ET AL.: "Real-Time Estimation of Rotor Position in PM Motors During Transient Operation" * Seite 312, linke Spalte, Absatz 3; Abbildungen 2,3 *	1,11,12	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (Int.Cl.6)
			H02P
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchierst	Abschlußdatum der Recherche	Prüfer	
BERLIN	27.Januar 1997	Kempen, P	
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht wurde ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus andern Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	
X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur			